

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ. ЧАСТЬ 1. МЕТОДИКА

Скурту И.Т., Ерошенко А.С., Брановицкий И.И.
Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Измерение количества витков в обмотках на каркасе, а также контроль наличия короткозамкнутых витков являются значимыми стадиями в цикле производства трансформаторов малой мощности.

Востребованная в настоящий момент точность измерения количества витков составляет порядка 0.1 % (один виток на тысячу). При этом в пределах одной операции технологического контроля требуется определять наличие короткозамкнутых витков, в катушках с диаметром провода от 0.18 мм с затрачиваемым на одну обмотку временем не более 10 секунд.

Точное измерение количества витков в обмотках сопряжено со многими известными сложностями магнитных измерений:

- обеспечение однородного магнитного потока в зоне измерения;
- устранение остаточной намагниченности рабочего ферромагнитного тела;
- учет полей рассеяния, способных влиять на результаты измерения;
- отстройка от температурного смещения рабочей точки.

Помимо этого, для обеспечения темпов конвейерного производства необходимо выдерживать баланс между скоростью и точностью измерений. Для обеспечения скорости предпочтительнее использовать открытую магнитную цепь в виде вертикального стержня с нанесенными на него намагничивающими и измерительными обмотками.

Среди подходов к измерению количества витков можно выделить балансные (разностные) и абсолютные (прямого подсчета) методы.

Распространенная реализация балансного метода основана на встречном включении обмотки с точно известным количеством витков (коммутируемые секции с сотнями, десятками и единицами витков) и испытуемой обмотки. В условиях открытой магнитной цепи такой подход может приводить к ошибке до ± 5 витков на тысячу. Основным источником ошибки – потоки рассеяния. Для оценки их влияния достаточно провести простой эксперимент: на катушку с числом витков 1000 доматывается один дополнительный виток (с отводом от тысячи). Катушка помещается на однородно намагниченный стержень (естественно, речь идет о центральном его участке со степенью однородности порядка 0.03 %). Обозначим сигнал напряжения с секции в 1000 вит-

ков, как S_{1000} , а сигнал с секции в 1001 соответственно S_{1001} . Следует отметить, что 1000 витков намотаны на катушку в восемь слоев. Имеем:

$$S_{1001} - S_{1000} \neq S_{1000} / 1000 \quad (1)$$

Отличие левой и правой части выражения (1) может составлять от 15 до 30 % (в зависимости от габаритов катушки и уровня электромагнитных помех). При этом:

$$S_{1001} / S_{1000} = 1.001 \quad (2)$$

Точность выполнения равенства (2) составляет уже около 0.015 – 0.03 %.

Выражение (1) показывает, что аддитивная компенсация (в балансном методе при открытой магнитной цепи) крайне неустойчива к накоплению ошибки по слоям катушки. Тем не менее при использовании в качестве ядра измерения величины (2) можно обеспечить требуемую точность.

Ошибки количества витков, возникающие при намотке обмоток, делятся на две основных категории:

1) технологическая недомотка/перемотка, составляющая несколько единиц витков и вызванная нечасто происходящими сбоями в работе оборудования;

2) ошибки программирования намоточного станка, вызванные человеческим фактором – количество витков при этом может отличаться от номинала в разы.

Величина (2) сохраняет свою информативную значимость и стабильность в каждом из этих случаев. В первом случае, она позволяет точно, до витка измерить отклонение от номинала, во втором – однозначно указать на необходимость перемотки.

Использование такого подхода наиболее эффективно для серийного контроля больших партий однотипных катушек.

Для этого проводится эталонирование типа катушки. В качестве эталона выбирается катушка, измерения на которой в составе готового изделия (трансформатора) полностью подтверждают требуемые его характеристики. Измерения в составе готового изделия чувствительны к отклонению витков в 0.1%.

В базу данных заносятся отношения сигналов, индуцируемых на каждой из обмоток эталонной катушки к сигналу с тысячевитковой эталонной обмотки, помещенной и зафиксиро-

ванной на рабочем ферромагнитном стержне. Такой подход является разновидностью абсолютного метода.

Фактически под отношением сигналов с различных обмоток подразумевается отношение их интегралов (по абсолютному значению), что эквивалентно отношению максимумов соответствующих потокосцеплений.

Интегрирование сигналов улучшает воспроизводимость результатов измерений и устойчивость метода к помехам. Также это устраняет влияние потоков рассеяния, поскольку результирующее отношение (2) уже включает в себя информацию о противопотоке для конкретного типа (один каркас может соответствовать сотням номенклатурных намоточных позиций).

Создание рабочей зоны однородного распределения потока накладывает строгие требования к общей длине стержня вне зависимости от метода создания однородности. Для открытой цепи она должна быть как минимум в три раза больше длины катушки.

Обеспечение однородного распределения с помощью многокатушечных схем (катушки с синхронной запиткой) выравнивания потока обнаруживает значительную неустойчивость к остаточной намагниченности стержня, а также к эффектам пространственной (по длине стержня) фазовой неоднородности (специфичной для конкретного материала стержня). Для борьбы с последней целесообразно обеспечивать однородность с помощью одной обмотки, нанесенной равномерно по всей длине стержня. При этом равномерное распределение потока устанавливается в стержне на тех участках периода сигнала, в течение которых материал находится в насыщении. Упомянутое выше интегрирование сигналов позволяет отстроиться от необходимости следить за уровнем потока, т.к. всегда обеспечивает доступ к максимальному его значению, гарантированно находящемуся на участке насыщения.

Отдельного рассмотрения заслуживает стабильность рабочей точки, положение которой на серии последовательных однотипных измерений подвержено релаксационным и температурным процессам. На рисунке 1 представлено поведение сигналов S_{1000} и S_{1001} на серии из двухсот измерений, непрерывно следующих одно за другим (продолжительность одного измерения составляет 5-7 секунд).

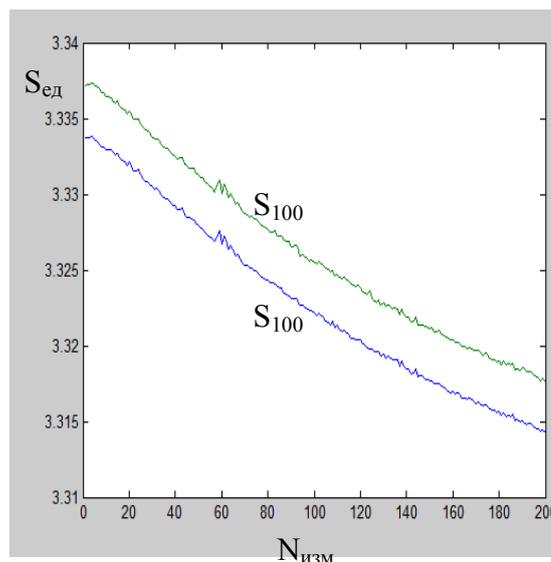


Рисунок 1 – зависимость сигналов S_{1000} и S_{1001} (в условных интегральных единицах) от номера измерения

Видно, что величина (2) позволяет компенсировать дрейф рабочей точки. Тем не менее, для снижения влияния быстрой смены режимов перемагничивания, в особенности при переходах с одной частоты на другую, следует периодически (раз в смену) проводить размагничивание стержня на частоте 50 Гц.

Детектирование короткозамкнутых витков основано на зависимости их электромагнитного поведения от частоты. Если в катушке с тысячей витков замкнуть один виток, то результатом измерения на низкой частоте (десятки Герц) будет 999 витков. Если виток разомкнуть и на этой же частоте провести измерения на той же катушке, но с помещенным на нее искусственно изготовленным КЗ-витком, показания составят 1000. На высокой частоте (единицы – десятки килогерц) наличие КЗ-витка любого вида приводит к снижению показаний на два-три и более витка (в зависимости от диаметра проволоки и частоты). Эталонирование типа катушки позволяет учесть высокочастотную ЭДС самоиндукции, наводимую в незамкнутых витках. Магнитные материалы с аморфной и нанокристаллической структурой хорошо подходят для создания рабочих стержней.

Разработанный метод позволяет отстроиться от распространенных проблем магнитных измерений и обеспечить высокоточный контроль количества витков в обмотках, совмещенный с проверкой на короткозамкнутые витки для больших партий однотипных катушек.